第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

基于探地雷达的土体构型无损探测方法研究

吴 全[1]， 姚喜军[1]， 陈晓东[2]， 赵 敏[2]， 赵 欢[2]， 云 浩[1]

（1. 内蒙古自治区国土空间规划院，内蒙古 呼和浩特 010000；
2. 内蒙古达智能源科技有限公司，内蒙古 呼和浩特 010000）

摘 要：土体构型对土壤水分、溶质运移过程和作物成长等有显著影响，常规测量采用人工挖土壤剖面取样、实验室化验分析等方法，其周期长效率低。针对以上问题，以探地雷达波形及其图像为研究对象，从检测土体构型的属性（层次、层厚、土质）入手，提出了一种使用探地雷达快速测量土壤土体构型的无损探测方法。基于探地雷达波形图像的纵向梯度信息能够反应土壤分层，采用包络检波法从探地雷达回波中提取包络信号，利用Hilbert分析其瞬时相位来确定分层位置；鉴于土壤介电常数与雷达回波振幅的关系，采用探地雷达回波振幅反演各层介电常数，由介电常数推算雷达波在土壤中的传播速度，以此得到土壤剖面各层厚度；根据探地雷达波形图的图像噪声与土壤砂壤比之间存在定量关系，提出采用主成分分析方法对每一层土质的图像进行噪声估计求得各层土壤的含砂量，结合支持向量机进而辨识各层土壤土质。建立涵盖地域信息、土壤指标、探测信息、图像多特征融合信息的土体构型知识库，并编制快速识别土壤土体构型的信息系统，在内蒙古自治区呼和浩特市周边2个试验基地、6个采样点、4类土壤土体构型使用该方法进行野外探测验证。研究表明：在上述地区地表以下1 m范围内的土体构型识别正确率达到94%以上；探测的每层土壤厚度相对测量误差小于10%。该研究方法为土体构型快速检测应用提供了一种新的中观探测思路。

关 键 词：土壤；土体构型；探地雷达；无损探测
文章编号：1000-6060(2022)06-1860-10(1860~1869)

土壤是地球上所有生态系统的自然支撑和生物屏障。近年来随着工业化、城市化进程的加剧，人与土地之间的矛盾也日益突出，土壤质量和可持续发展已成为社会经济发展和土壤学、农学、环境科学等研究的热点[1]。土壤质量检测方法通常有宏观和微观两种，宏观即卫星遥感探测法，是利用卫星遥感技术探测土壤表层属性，对土壤表层含水率、全氮和全磷含量、盐渍化、重金属含量等参量进行检测[2-7]，能以不同时空尺度不断地观察地表情况，提供地表特征信息[8]，适用于空间覆盖范围较广的土壤表层信息监测，但监测数据的空间分辨率往往偏低；微观即点测法，是通过剖面挖掘、打土钻、取样方、测土样等方式获得有限的点测数据[9]，来推断整个面或三维空间的土壤质量，测量准确，但仅适用空间覆盖范围偏小的检测。从空间上来讲，遥感探测法与点测法不够全面，亟需在中观上建立一种客观、快速、准确的土壤质量检测方法。

探地雷达是一种利用高频电磁波的反射探测目的体即地质现象的物探方法，亦称地质雷达，具有高效、快速、连续、无损、低成本和高分辨率成像等特点，已成为公路路面、机场道面、隧道、水坝和堤防等层状结构基础工程设施无损检测技术的重要组成部分[10-12]。近年来，随着探地雷达技术的快速发展逐渐应用到土壤检测领域中，成为宏观探测

收稿日期：2022-03-09； **修订日期**：2022-05-24
基金项目：内蒙古自治区科技成果转化项目(2019CG071)资助
作者简介：吴全(1964-)，博士，硕士生导师，主要从事农业水土资源优化利用等方面的研究. E-mail: 651668946@qq.com
通讯作者：赵敏(1986-)，硕士，工程师，主要从事测控、信息系统等方面的研究. E-mail: 617933488@qq.com

与微观探测之间尺度转化的纽带。如吴志远等[13]利用探地雷达早期信号振幅包络法平均值方法和时域反射技术分别探测降水前后野外农田表层的土壤含水率，结果表明利用探地雷达波早期信号振幅包络值能够获得与时域反射技术实测精度相近的黏性土壤含水率；侯晓冬等[14]将探地雷达用于土壤污染物探测中，以土壤介电常数为纽带，通过神经网络技术，建立介电常数、雷达回波信号和污染土壤多个参数之间的联系，能够实现污染土壤中多种污染物含量的检测；也有部分学者将探地雷达用于土壤深度和分布的探测，如赵艳玲等[15]使用探地雷达在室外进行复垦土壤层次无损探测的模型实验，证明探地雷达能够有效探测土层厚度和结构。以上研究，第一从探地雷达回波信号着手，建立土壤与雷达波形数据的关系；第二研究土壤的单一属性，如含水率、层厚、分布、污染物含量等。本文提出了一种使用探地雷达快速测量土壤土体构型的无损探测方法。该方法分别以探地雷达波形及其图像为研究对象，结合探地雷达波形数据分析算法、土壤介电常数推演、基于主成分的图像白噪声估计、支持向量机等技术，研究土壤探地雷达波形与土壤物性之间的关系，以探测土壤剖面的三大主要属性(层次、层厚、土质)，综合地对土壤土体构型进行研判，并编制了一套快速识别土壤土体构型的信息系统。野外探测试验表明该方法实现了对试验基地区域内土壤土体构型快速地、无损地探测。

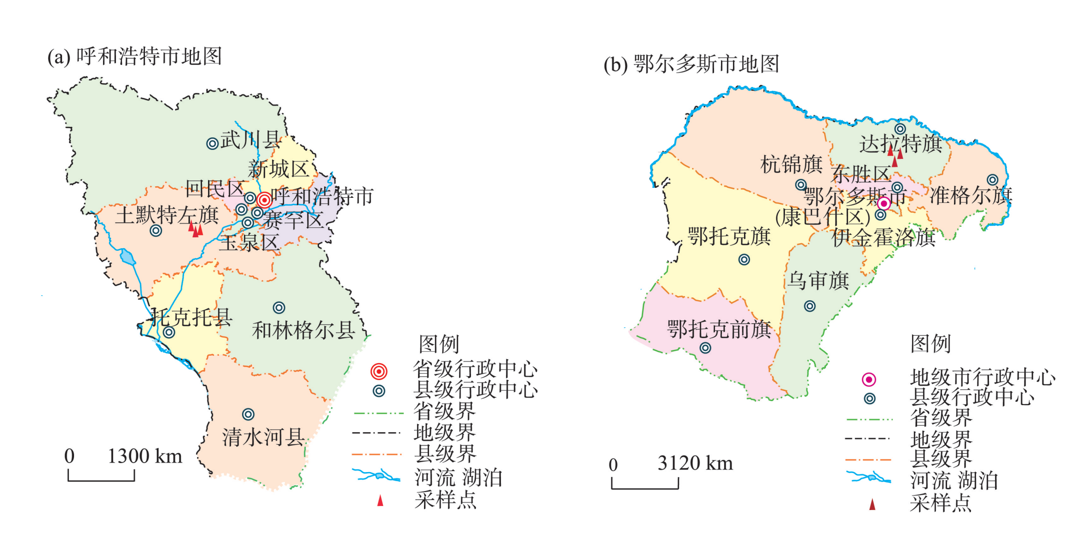
1　研究区概况

试验选择2个典型区域，分别位于内蒙古自治区标准耕作制度分区中Ⅱ5河套平原区的土默特左旗和Ⅱ2黄土丘陵区的达拉特旗(图1)。土默特左旗位于内蒙古自治区中南部、黄河北岸，属于典型大陆性半干旱季风气候。降水年际变化大，且年内分配不均，7—9月降水量占全年降水量的68.8%，年平均降水量约350 mm。试验采样区位于土默特左旗(109°54′44.3″E，40°19′46.0″N)附近，分别设置3个采样点，采集的典型土壤剖面构型为壤土/黏土(表示上层为壤土下层为黏土，后文描述的土体构型均以此方式表示)、砂壤土/壤土。达拉特旗地处内蒙古自治区鄂尔多斯高原北端，黄河中游内蒙古段“几字湾”南岸[16]，属于典型的半干旱大陆性气候，受季风环流影响，达拉特旗春季降水少，夏季降水集中，且容易出现大到暴雨天气，该地区降水季节分配不均，旱涝灾害频繁，年平均降水量约300 mm。试验采样区位于达拉特旗的库布其沙漠(109°53′11.4″E，40°16′41.7″N)附近，设3个采样点，采集的典型土壤剖面构型为砂土/砂壤土、通体砂。

2　数据与方法

2.1　数据采集

选取壤土/黏土、砂壤土/壤土、砂土/砂壤土、通



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载，其中图a为审图号蒙S(2020)022号的标准地图制作，图b为审图号蒙S(2020)028号的标准地图制作，底图边界均无修改。

图1　采样区域图

Fig. 1　Plot of the sampling area

体砂4种具有明显差异的土体构型作为试验对象，在无作物覆盖的耕地开展雷达测线布置和土壤剖面点测双盲测试。每种土体构型分别布置了10条长10 m的平行测线。

点测采样：在每条测线的中点进行土壤剖面挖掘，土壤剖面描述主要依据土壤颜色、土壤松紧度、粒径分布等特征判定，测量各质地层次的深度和厚度，利用质地层次排列顺序及层次厚度初步判定土体构型，取各层土壤样品，进行实验室化验测定土壤指标参数。

探地雷达采样：设备采用青岛中电众益智能科技发展有限公司的GER-10型脉冲式探地雷达（图2），因试验区的耕作土层厚度约为1 m，结合土壤介电特性受土壤质地影响的最小范围，选取900 MHz的发射天线，雷达具体参数及指标见表1。



图2 GER-10型脉冲式探地雷达

Fig. 2 GER-10 pulsed ground penetrating radar

表1 GER-10型脉冲式探地雷达技术参数及指标

Tab. 1 Technical parameters and indexes of GER-10 pulsed Ground Penetrating Radar

技术参数	指标
最大扫描速度	215 $Traces \cdot s^{-1}$
采样模式	时间模式、距离模式、点测模式
时间窗范围	1~8000 ns
增益范围	-10~160 dB
中心频率	900 MHz
深度范围	0.5~1.5 m
耦合方式	地面耦合

探地雷达沿平行测线往返探测数据，一条测线探测4次。现场测量开始前首先使用Pereometer V.7型介电常数仪、SU-LB型土壤水份仪对样地进行探测，根据探测值对雷达的采集参数进行设定。当遇到坑洼地区时，截断采集数据避免空气波对图像的影响。一条测线探测1次约生成4~6组雷达波形图。参数设定的内容包括时间窗口大小、扫描样点数、每秒扫描数、A/D转换位数、增益点数等内容[17]。参数设置的是否合理影响到记录数据的质量，至关重要。

（1）探测深度与时窗长度

探测深度的选择尤为重要，选得太小会丢掉重要数据，选得太大会降低垂向分辨率。一般选取探测深度（H）为目标深度的1.5倍。文中探测的土壤深度为1 m，探测深度设置为1.5 m。根据H和介电常数（ε）确定采样时窗长度（Range，单位为ns），公式如下：

$$\text{Range} = 2 \times \frac{H \times (\varepsilon)^{1/2}}{0.3} = 6.6 \times H \times (\varepsilon)^{1/2} \quad (1)$$

以达拉特旗的砂土/砂壤土为例，该区域为农耕土，ε为11，Range应选40 ns，时窗选择略有富余。

（2）A/D采样分辨率

雷达的A/D转换有8 Bit、16 Bit、24 Bit，由于探测深度在1.5~5 m之间，采集速度平缓，选择16 Bit。

（3）采集模式及扫描样点数

采集模式分点测模式、距离模式、时间模式，试验时选择距离模式，该模式下雷达按照相等的距离间隔采集雷达数据。扫描样点数Samples有128、256、512、1024、2048可选，对于雷达中心频率为Fa、时窗长度为Range，Samples应满足下列关系：

$$\text{Samples} \geqslant 10 - 8 \times \text{Range} \times \text{Fa} \quad (2)$$

为保证高的垂向分辨，在容许的情况下Samples尽量选的大些。文中雷达主频率Fa为900 MHz，Range为40 ns，每一道扫描样点数大于360，选择接近值为512。

（4）扫描速率

即系统每秒采集的数据道数，GER-10有32、64、128、256、512共计5种，降低扫描速率可以提高系统的信噪比。当选择距离模式采集数据时，扫描速率自动设置在当前采样点数下的最高扫描速率。如本文主机连接900 MHz天线，扫描样点数设置为512，则扫描速率自动选择为512 $Traces \cdot s^{-1}$（道每秒），测距轮的间隔设置为2 cm，那么雷达的最大工作速度为36.86 $km \cdot h^{-1}$，如果天线的移动速度超过该速度时采集数据水平距离的误差将增大。

2.2 研究方法

2.2.1 图像预处理 地下所有物体会产生回波信号，介质的不均匀也会产生回波信号[18]。土壤粒径大小、压实度、含水程度、地面坡度等几何特性的不均匀性，使得探地雷达接收的回波信号包含多种随机噪声和杂波干扰。本文利用均值法、带通滤波法、中值滤波法、指数增益调节等信号处理算法对雷达波数据进行去除背景影响、高频杂波、来自地面发射的直达波、信号增强等预处理，提高信号的信噪比[19]。

2.2.2 基于包络检波的土壤分层信息识别 探地雷达发射的电磁波信号遇到不同质地的土壤时会产生不同波形幅度与相位的回波，波形的正负峰分别以白色和黑色标识、以灰阶或彩色标识。这样，同相轴或等灰度、等色线即可形象的表征地下反射面。反射脉冲波形的明显程度，是对探地雷达图像进行地质解释的重要依据[20]。

为抑制干扰噪声的影响，采用基于Hilbert的包络检波法从探地雷达回波中提取包络信号[21-24]，分析其瞬时相位来确定土壤分界面的位置。探地雷达的回波信号 $x(t)$ 进行Hilbert变换，公式如下：

$$\hat{X}(t)=x(t)*\frac{1}{\pi t} \tag{3}$$

式中：$\hat{X}(t)$ 为Hilbert变换后所得结果；$x(t)$为探地雷达回波信号；t为时间；$*$表示卷积运算。构建复数域的解析信号 $\tilde{x}(t)$，公式如下：

$$\tilde{x}(t)=x(t)+j\hat{X}(t) \tag{4}$$

式中：j为虚部单位。利用解析信号的实部与虚部求得时域振幅包络信号 $A(t)$，公式如下：

$$A(t)=\sqrt{x^2(t)+\hat{X}^2(t)} \tag{5}$$

并求得瞬时相位信号 $\phi(t)$，公式如下：

$$\phi(t)=\arctan\frac{\hat{X}(t)}{x(t)} \tag{6}$$

然后对 $\phi(t)$ 进行高阶最小二乘拟合得到拟合曲线。经反复试验，当阶数取20时拟合曲线的凹凸拐点与土壤剖面分界线的实际位置几乎完全拟合。因此将该拟合曲线上的凸凹拐点处作为土壤分界面的时域位置。

2.2.3 土壤介电常数与土层厚度计算 采用探地雷达回波振幅反演介电常数方法[25-27]，确定结构层的介电常数与回波的波幅关系，公式如下：

$$\varepsilon_i=\varepsilon_{i-1}[(1+R)/(1-R)]^2 \quad i=1,2,\cdots,N \tag{7}$$

式中：ε_i 为下层介质的介电常数；ε_{i-1} 为上层介质的介电常数；R 为反射系数；N为表层土壤的总层数。R的计算公式如下：

$$R=\frac{A(t)}{A_m} \tag{8}$$

式中：$A(t)$为反射波幅；A_m 为全反射波幅数值，可以通过金属板试验获得。利用探地雷达测量时，顶层介质为空气，第1层介质为第1层土壤。因此可由顶层的空气介电常数，推演出第1层土壤介电常数，依次可推出其他土层的介电常数。而对于介电常数为 ε_i 的土壤介质来说，电磁波在土壤中传播的速度(v_i)可由公式(9)推导：

$$v_i=c\times\varepsilon_i^{-1/2} \tag{9}$$

式中：c为电磁波在真空中的传播速度，取3×10^8 m·s^{-1}。各土层厚度计算公式为：

$$\Delta H_i=\frac{1}{2}(v_i\times\Delta t_i) \tag{10}$$

式中：ΔH_i 为第 i 层土壤厚度；Δt_i 为电磁波在第 i 层土壤中的双程时延。土层厚度可根据探地雷达在土层中回波时延和电磁波传播速度计算获得。

2.2.4 土质识别方法研究 （1）基于主成分分析的土壤图像噪声估计。土壤的粒径、密度、孔隙度、渗透性、磁性等属性不同，生成的回波信号图像包含噪声不同，因此通过估计探地雷达回波图像噪声可间接反映所测土质的属性。陈晓东等[28]对土壤的探地雷达图像进行基于回归分析和主成分分析(Principal component analysis，PCA)的真实噪声均方差的估计，提出一种利用图像噪声估计分析土壤含砂量的方法，并指出回波图像噪声数值大小与土壤含砂量成正比关系。本文利用该方法，来计算土壤的含砂量。

探地雷达所采集到的含噪图像(f)可看作是由不含噪声的真实图像(r)和加性高斯白噪声信号(n)组成，其表达式为:

$$f=r+n \tag{11}$$

式中：n 为均值为零、方差为 $\hat{\sigma}_n^{\,2}$ 的加性高斯白噪声信号。依据文献[29]的分析，将图像数据 f 、r 变换到PCA域中得到：

$$\lambda_{\min}(C_f)=\lambda_{\min}(C_r)+\hat{\sigma}_n^{\,2} \tag{12}$$

式中：$\lambda_{\min}(\cdot)$ 为求取协方差矩阵的最小特征值；C_f 为 f 的协方差矩阵；C_r 为r 的协方差矩阵；$\hat{\sigma}_n^{\,2}$ 为加性高斯白噪声信号的方差。由于真实图像的细节

信息不丰富且具有信息冗余特性，r 的数据主要分布在有限主分量上，研究时可以忽略，即存在如下公式：

$$\lambda_{\min}(C_r)=0 \tag{13}$$

由此，可以用高斯噪声的方差来估算探地雷达回波图像的方差值，即公式(12)简化为如下公式：

$$\lambda_{\min}(C_f)=\hat{\sigma}_n^{\ 2} \tag{14}$$

对每一层土质图像都进行噪声估计，将计算的方差值作为该层土质识别的特征参数之一，其数值大小可间接反映土壤含砂量大小。

(2) 土壤含水率。在降水或灌溉与土层深度相同的条件下，不同土质因渗透性能存在差异其土壤含水率不同，因此将土壤含水率作为土质识别的另一特征参数。本文使用经典的Topp多项式[30]来计算 ε_i 的第 i 层土壤含水率(θ)，ε_i 的计算方法参见公式(7)，θ 的计算公式如下：

$$\theta=-5.3\times10^{-2}+2.92\times10^{-3}\times\varepsilon_i-5.5\times10^{-4}\times\varepsilon_i^2+4.3\times10^{-6}\times\varepsilon_i^3 \tag{15}$$

(3) 支持向量机的土质识别。以每类土质图像所计算的 $\hat{\sigma}_n^{\ 2}$、θ、平均灰度、三阶中心矩、一维熵(H)(表示图像中灰度分布聚集特征所包含的信息量)等组成样本特征向量并建立对应的土质特征库，将土质特征库数据带入支持向量机进行训练并识别各土层的土质。

3 结果与分析

3.1 室内试验分析

在分析研究阶段，2019年8月设计并建设了土壤分析试验仓。针对土体构型检测设计了5层土壤分层试验，第1~3层和第5层分别铺设粒径为大于2 cm、等于2 cm、1~2 cm、1 cm大小的砂壤土，第4层铺设粒径0.5~1 cm黏土层。采集的原始图像、预处理图像与分析结果图像如图3所示，图中纵轴为土壤深度，水平纵轴为雷达扫描道数，下文以此图像分析土壤的土体构型。

将图3b中每道雷达数据沿行径方向取均值，并进行归一化和去直流分量处理，得到如图4所示黑色土层轮廓线，对其进行Hilbert变换后得到红色上包络线、绿色下包络线。

图4中包络线的瞬时相位信号最小二乘拟合后得到瞬时相位拟合曲线(图5)，利用微积分获取曲线凸凹拐点(图5中绿色圆圈)，凸凹拐点所在位置即为各土层分界点，最终求得土壤分层图像(图3c)。

表2为室内土壤土体构型试验数据结果。其中包括采用传统仪器测量的结果，简记为测量值，通过本方法计算出的结果简记为计算值。从表2可以看出，本文所述方法与实测数据相比，介电常数的相对误差最小为6.16%，最大为9.57%，层厚的相对误差最小为7.58%，最大为9.13%；土壤含水率的相对误差最小为8.46%，最大为9.69%。另外，土层的雷达回波图像噪声方差越大，其对应的土壤含砂量越大，且各土层的图像噪声方差差异较大，土壤剖面构型总体识别也较为准确。

3.2 土体构型知识库的创建与系统搭建

建立了涵盖土壤的地域信息(如所属旗县、坐标范围、气候信息)、属性指标(土质、含水率、容重、

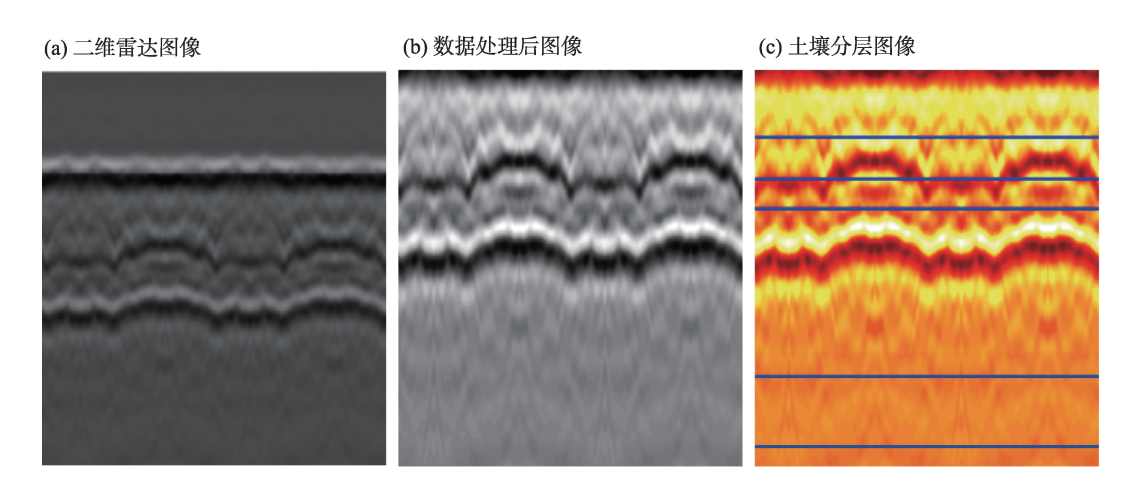


图3 探地雷达图像

Fig. 3 Image of ground penetrating radar

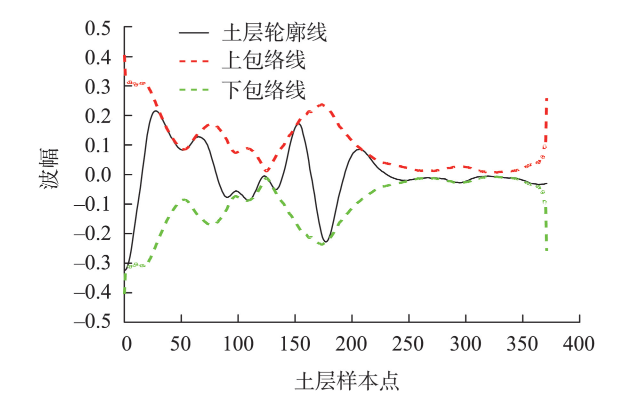


图4　包络分析曲线图

Fig. 4　Abacuses of envelope analysis

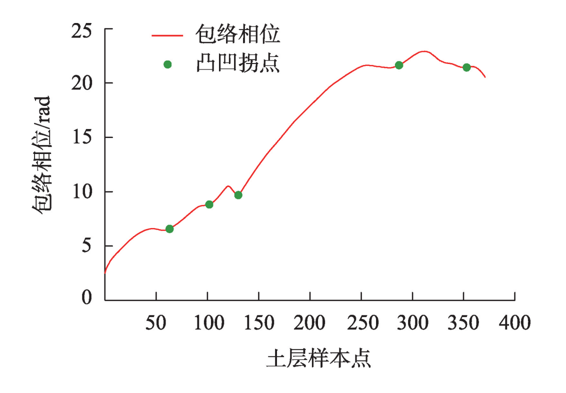


图5　瞬时相位拟合曲线及凸凹拐点图

Fig. 5　Instantaneous phase fitting curve and convex and concave inflection point plot

实际剖面构型属性)、雷达探测信息(探地雷达设置参数、探测时间、探线走向、探测波形图)、图像多特征融合信息(噪声方差、平均灰度、三阶中心距、一维熵等)的土体构型特征知识库。建立的基于土壤容重为1.4~1.6 t·m^{-3},土壤含水率为4%~7%的典型沙地、砂壤土/壤土、壤土/黏土、砂土/砂壤土7种土体构型知识库样,是智能分析土体构型的基础支撑。

搭建基于探地雷达的土体构型快速检测系统,具有雷达波形预处理、数据分析、智能检测和实验报表自动生成等功能。波形预处理包括取值去直达波、中值滤波、高斯滤波、增益调整等;数据分析主要包括数据导入及筛选、分析检测、指标计算、结果呈现、辅助功能;智能检测从探地雷达数据中分析土壤的土体构型,并给出各项指标;实验报表包括当前实验分析数据报表和历史分析报表。

3.3　野外试验分析

2020年9月在土默特左旗和达拉特旗采集土壤土体构型(壤土/黏土、砂土/砂壤土)进行野外双盲试验。图6a与图6b为壤土/黏土的分层结果图像和剖面图,图6c与图6d为砂土/砂壤土的分层结果图像和剖面图。试验证明,本方法计算的分层层数、土质与实际测试的结果相同,壤土/黏土的层间厚度误差在2~6 cm之间,砂土/砂壤土的层间层厚误差在1~6 cm之间,被检测土壤的土体构型与实际完全相符,准确率约为94%。具体的土体构型试验结果见表3。

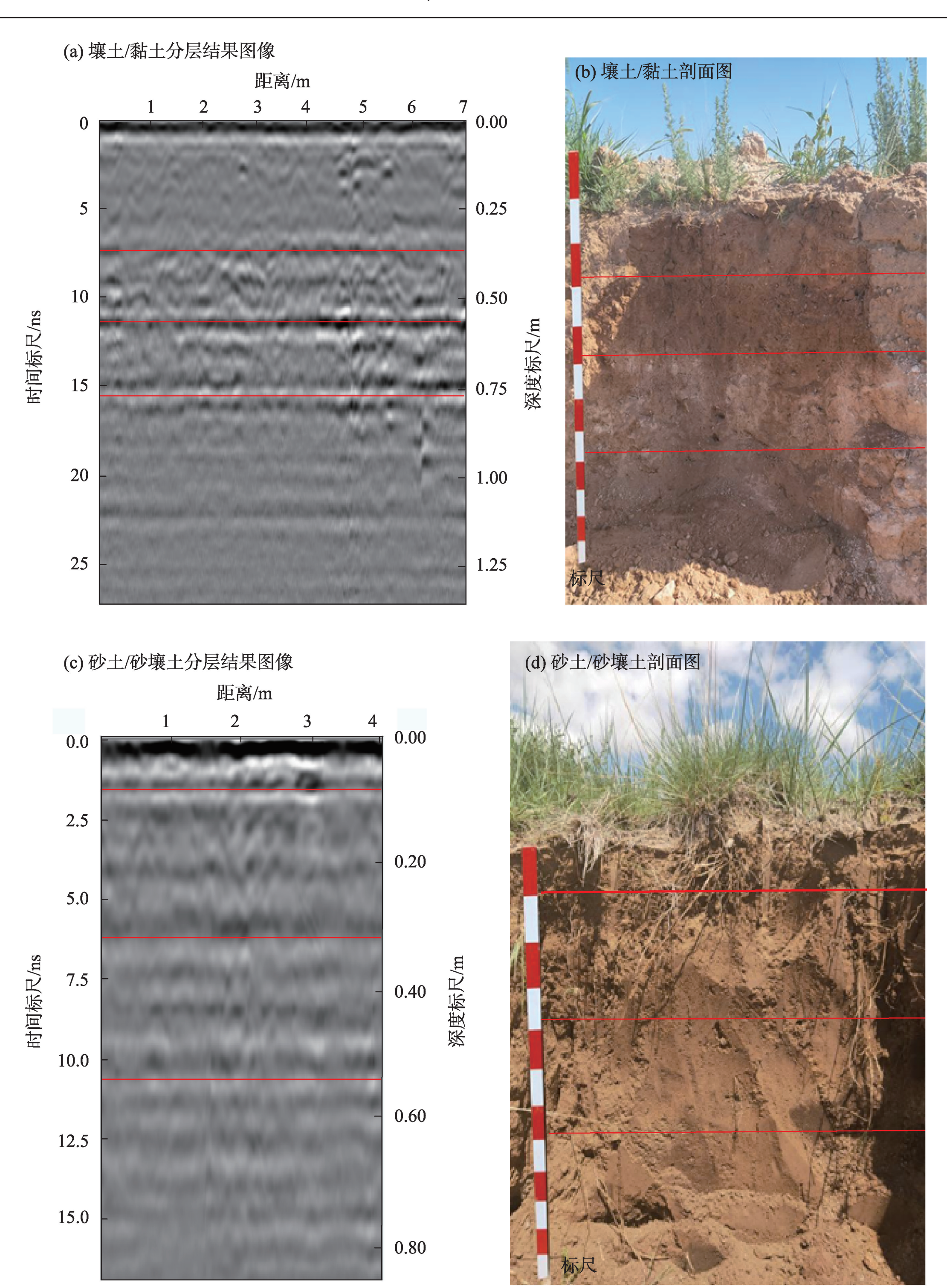
4　讨 论

采用本方法野外探测的4种土体构型,土壤层次均为4层,除障碍层外每层土壤厚度大约20~30 cm,相邻层的土壤质地具有相似性,土壤层次探测

表2　土壤属性检测结果

Tab. 2　Results of soil property testing

所测参数		第1层土壤	第2层土壤	第3层土壤	第4层土壤	第5层土壤
介电常数	测量值/m	3.41	2.86	3.15	3.45	3.44
	计算值/m	3.62	3.11	3.43	3.78	3.75
	相对误差/%	6.16	8.74	8.89	9.57	9.01
层厚	测量值/cm	20.00	12.00	8.00	45.00	20.00
	计算值/cm	21.56	12.91	8.73	48.63	21.65
	相对误差/%	7.80	7.58	9.13	8.07	8.25
土壤含水率	测量值/%	4.02	2.58	3.42	4.23	4.15
	计算值/%	4.36	2.81	3.73	4.64	4.55
	相对误差/%	8.46	8.91	9.06	9.69	9.64
土壤含砂量	计算值/%	28.27	26.35	25.14	9.25	23.21
	图像噪声方差值	822.00	792.00	760.00	306.00	680.00
土质	识别结果	砂壤土	砂壤土	砂壤土	黏土	砂壤土



注：图像中的红色直线表示土壤的分层位置，红白标尺一个颜色的长度为10 cm。

图6 探测结果对比图像

Fig. 6 Comparison image of probe results

准确；由于探地雷达采用的介电常数为仪器探测均值，输出的探测深度略有偏差，相比人工检测土层厚度误差在6 cm以内；每层土壤图像的噪声估计差异明显，土质检测结果与人工基本一致，总体土体构型识别较为准确。

本研究从室内控制实验出发，分析土壤物性与探地雷达波形及其图像间定性与定量的关系，提出利用探地雷达波形的纵向梯度信息分析土层层次，以雷达回波振幅反演土壤介电常数进而推到每层土壤层厚，以图像噪声方差来估计土壤含砂量的理

表3　土体构型试验结果表

Tab. 3　Soil configuration test results of Tumed Left Banner

区域	取得数据方式	层数	层号	层厚/cm	土质类型
土默特左旗	人工采样	4	1	30	砂土
			2	24	砂土
			3	25	砂壤土
			4	>69	砂壤土
	系统分析	4	1	36	砂土
			2	22	砂土
			3	19	砂壤土
			4	>75	砂壤土
达拉特旗	人工采样	4	1	9	壤土
			2	22	壤土
			3	30	黏土
			4	>70	黏土
	系统分析	4	1	8	壤土
			2	27	壤土
			3	24	黏土
			4	>65	黏土

论，然后以野外双盲探测的方法验证了该方法在土壤土体构型检测中的适应性。第1次提出把探地雷达波形图像作为研究内容，从图像分析的角度来识别土壤质地，丰富并拓展了此类研究项目的数据源和解决问题的思路；创新性地提出将传统人工检测仪表与探地雷达相结合进行土壤物性探测，以土壤的层次、厚度、土质为切入点综合地分析土体构型的工程思想。与以往发表的论著不同，本文结合探地雷达波形图像分析方法，从综合的角度给出了一种检测土壤土体构型的方法，并通过室内控制实验和野外实验进行了验证，具有较大的工程意义；相比人工挖剖面分析方法，既不损坏原有土壤结构，又极大地提高了检测速度和范围。

研究发现，由于使用的探地雷达收发信号是脉冲电磁信号，雷达回波数据受地表植被覆盖物、地下植物根系等因素影响较大，其距离地面的真空距离大于一定范围时，将影响采集的信号精度，为此实际探测时应避开植被覆盖时间或地点；探地雷达回波信号受水的干扰很大，特别是处于水饱和状态时土壤的其他特性在图像中均被掩盖，野外实际测量应避开雨天并在地表比较干燥时进行测量，参考地表土壤黏度、水分等情况合理设置雷达探测参数。同时，发现土壤障碍层含水率相对较高，依据探地雷达回波信号与水的关系，可以用这一特性探测土壤障碍层或者水管管道漏水点检测等。

本文已经证明在典型区域使用此方法可以快速、无损、准确地探测土壤土体构型，但我国区域辽阔，土壤土体构型差异较大，雷达发射信号在这些土壤中的穿透能力、受干扰情况也不同，具体扩展到其他区域的试验需下一步工作中进行深入研究。

5　结　论

（1）通过基于包络检波的土壤分层信息识别方法，可得到不同土体结构的分层图像，清晰地展示了地下土壤分层特征，并利用探地雷达回波振幅反演介电常数、估算土壤厚度，虽存在一定测量误差，但土壤分层层数、层厚与现场剖面实测结果基本相符。

（2）实验结果表明：土壤中含砂量越多，对应探地雷达波的反射强度越大，雷达波图像噪声越强；因黏土、壤土、砂壤土、砂土的含砂量依次增多，所对应的雷达波图像噪声逐渐变强。

（3）用经典的Topp多项式计算土壤含水率、基于PCA的土壤图像噪声估计法来间接估算土壤含砂量多少，最后使用土壤含水率、图像噪声方差和其他图像特征参数组成特征向量，利用支持向量机对土壤各层土质进行识别，识别结果正确。

参考文献（References）

[1]　李彬彬, 许明祥, 巩晨, 等. 国际土壤质量研究热点与趋势——基于大数据的Citespace可视化分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1983−1998. [Li Binbin, Xu Mingxiang, Gong Chen, et al. Hotspots and trends in international soil quality research[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(11): 1983−1998.]

[2]　陈国茜, 祝存兄, 李素雲, 等. 三江源地区土壤水分的地理分区遥感模型构建及时空变化[J]. 草地学报, 2021, 29(增刊1): 199−207. [Chen Guoqian, Zhu Cunxiong, Li Suyun, et al. Remote sensing model construction and spatial-temporal changes of soil moisture in the Three-River Headwaters region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(Suppl. 1): 199−207.]

[3]　马驰. HJ−1A HSI与Sentinel−2A遥感数据土壤全氮含量反演精度的对比研究[J]. 无线电工程, 2021, 51(12): 1540−1548. [Ma Chi. Accuracy comparison of soil total nitrogen content inversion based on HJ−1A HSI and Sentinel−2A remote sensing data[J]. Radio Engineering, 2021, 51(12): 1540−1548.]

[4]　乔璐, 陈立新, 董诚明. 基于高光谱遥感技术对土壤氮磷钾的估算[J]. 森林工程, 2018, 34(6): 25−31, 71. [Qiao Lu, Chen Lixin, Dong Chengming. Estimates of soil N, P, K concentration by using

hyperspectral remote sensing technology[J]. Forest Engineering, 2018, 34(6): 25-31, 71.]

[5] 王爽, 丁建丽, 王璐, 等. 基于地表光谱建模的区域土壤盐渍化遥感监测研究[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 190-198. [Wang Shuang, Ding Jianli, Wang Lu, et al. Remote sensing monitoring of soil salinization based on surface spectral modeling[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 190-198.]

[6] 成永生, 周瑶. 土壤重金属高光谱遥感定量监测研究进展与趋势[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3450-3467. [Cheng Yongsheng, Zhou Yao. Research progress and trend of quantitative monitoring of hyperspectral remote sensing for heavy metals in soil[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3450-3467.]

[7] 叶明亮, 杨梦丽, 刘纯宇, 等. 高光谱遥感在土壤重金属污染监测中的应用[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(6): 1-5, 60. [Ye Mingliang, Yang Mengli, Liu Chunyu, et al. Application of hyperspectral remote sensing in monitoring heavy metals in soil[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, 30(6): 1-5, 60.]

[8] 王思楠, 李瑞平, 韩刚, 等. 基于遥感数据对毛乌素沙地腹部旱情等级的景观变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 1080-1087. [Wang Sinan, Li Ruiping, Han Gang, et al. Characteristics of the landscape changes under the hinterland drought conditions in Mu Us Sandland[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 1080-1087.]

[9] 李开丽, 檀满枝, 密术晓, 等. 基于土壤剖面质地构型的土壤质量评价——以河南省封丘县为例[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1253-1260. [Li Kaili, Tan Manzhi, Mi Shuxiao, et al. Evaluating soil quality with texture profile configuration: A case study of Fenqiu, Henan[J]. Soil, 2016, 48(6): 1253-1260.]

[10] 周春晓, 陈晔. 探地雷达研究进展[J]. 南京师大学报(自然科学版), 1998, 21(1): 111-115. [Zhou Chunxiao, Chen Ye. The progress of ground penetrating radar[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 1998, 21(1): 111-115.]

[11] 何瑞珍, 胡振琪, 王金, 等. 利用探地雷达检测土壤质量的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1483-1492. [He Ruizhen, Hu Zhenqi, Wang Jin, et al. The progress of using ground penetrating radar to detect the soil quality[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(4): 1483-1492.]

[12] 廖彬彬. 深度学习在探地雷达目标识别中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019. [Liao Binbin. Research on the application of deep learning in target recognition of ground penetrating radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.]

[13] 吴志远, 杜文凤, 聂俊丽, 等. 基于探地雷达早期信号振幅包络值的黏性土壤含水率探测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 115-121. [Wu Zhiyuan, Du Wenfeng, Nie Junli, et al. Detection of cohesive soil water content based on early signal amplitude envelope of ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 115-121.]

[14] 侯晓冬, 郭秀军, 贾永刚, 等. 基于探地雷达回波信号获取污染土壤中污染物含量的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 962-968. [Hou Xiaodong, Guo Xiujun, Jia Yonggang, et al. Progress on detection of contamination content in the contaminated soil based on ground penetrating radar[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 962-968.]

[15] 赵艳玲, 王金, 贡晓光, 等. 基于探地雷达的复垦土壤层次无损探测研究[J]. 科技导报, 2009, 27(17): 35-37. [Zhao Yanling, Wang Jin, Gong Xiaoguang, et al. Nondestructive detection of soil layer based on GPR[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(17): 35-37.]

[16] 李玲蔚, 白永平, 杨雪荻, 等. 黄河几字湾地区可持续发展的动态演变及区域差异[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 639-649. [Li Lingwei, Bai Yongping, Yang Xuedi, et al. Dynamic evolution and regional differences of sustainable development in Jiziwan of the Yellow River[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 639-649.]

[17] 邓世坤. 探地雷达野外工作参数选择的基本原则[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(5): 323-329. [Deng Shikun. On the basic principles for the choice of GPR field survey parameters[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(5): 323-329.]

[18] 谢国兰. 基于探地雷达的土壤含水量分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2009. [Xie Guolan. Analysis of soil water content based on ground penetrating radar[D]. Nanchang: Nanchang University, 2009.]

[19] 杨兆良. 探地雷达信号处理及软件研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2005. [Yang Zhaoliang. Ground penetrating radar signal processing and software development[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005.]

[20] 闫永斌. 探地雷达图像识别与处理[D]. 北京: 北京化工大学, 2008. [Yan Yongbin. Ground penetrating radar image recognition and processing[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.]

[21] 石荣, 邓科, 阎剑. 两种脉冲信号包络提取方法的联系及性能分析[J]. 无线电工程, 2021, 51(1): 1-7. [Shi Rong, Deng Ke, Yan Jian. Relationship and capability analysis on two pulse signal envelope extraction methods[J]. Radio Engineering, 2021, 51(1): 1-7.]

[22] 何岭松, 杨叔子. 包络检波的数字滤波算法[J]. 振动工程学报, 1997(3): 116-121. [He Lingsong, Yang Shuzi. Envelop estimation by a pair of digital filters[J]. Journal of Vibration Engineering, 1997(3): 116-121.]

[23] 王益有, 胡勇峰, 王亚杰, 等. 基于Hilbert包络与阶次分析的轴承故障诊断[J]. 汽车零部件, 2022(7): 74-78. [Wang Yiyou, Hu Yongfeng, Wang Yajie, et al. Bearing fault diagnosis based on Hilbert envelope and order analysis[J]. Automobile Parts, 2022(7): 74-78.]

[24] 丁颖, 隋顺琦, 王开云, 等. 基于Hilbert包络分析的铁路货车踏面擦伤诊断[J]. 铁道车辆, 2022, 60(2): 52-55. [Ding Ying, Sui Shunqi, Wang Kaiyun, et al. Wheel tread flat diagnosis of railway freight wagons based on Hilbert envelope analysis[J]. Rolling Stock, 2022, 60(2): 52-55.]

[25] 秦艳芳. 基于探地雷达的干旱区土壤水分反演精度分析[J]. 资源信息与工程, 2018, 33(6): 130–133, 135. [Qin Yanfang. Precision analysis of soil moisture retrieval based on ground penetrating radar in arid region[J]. Resource Information and Engineering, 2018, 33(6): 130–133, 135.]

[26] Haukalid K, Folgero K. Broad-band permittivity measurements of formation of gas hydrate layers using open-ended coaxial probes [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(9): 7196–7205.

[27] 李蕙君, 钟若飞. 探地雷达波振幅与土壤含水量关系的数值模拟[J]. 应用科学学报, 2015, 33(1): 41–49. [Li Huijun, Zhong Ruofei. Numerical study on the relationship between amplitudes of ground penetrating radar wave and water content in soil[J]. Journal of Applied Sciences, 2015, 33(1): 41–49.]

[28] 陈晓东, 姚喜军, 云浩, 等. 基于噪声估计的表层土壤质地快速检测[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(2): 38–40. [Chen Xiaodong, Yao Xijun, Yun Hao, et al. Rapid detection of surface soil texture based on noise estimation[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(2): 38–40.]

[29] Liu X H, Tanaka M, Okutomi M. Single-image noise level estimation for blind denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 5226–5237.

[30] Topp G C, Davis J L. Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling[J]. Advances in Irrigation, 1985 (3): 107–127.

Nondestructive inspection method for soil profile configuration based on ground penetrating radar

WU Quan[1], YAO Xijun[1], CHEN Xiaodong[2], ZHAO Min[2], ZHAO Huan[2], YUN Hao[1]

(1. Inner Mongolia Autonomous Region Territorial Space Planning Academy, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Dazhi Energy Technology Co Ltd., Hohhot 010000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Soil body configuration has a significant impact on soil moisture, solute transport process, and crop growth. Generally, measurements are performed using manual digging of the soil profile and sample collection, and then taking the samples to the laboratory for testing and analysis, etc., which has a low cycle length and low efficiency. To solve the aforementioned problems, by taking the ground penetrating radar (GPR) waveform and its image as the research object, and starting from the detection of the level, layer thickness, and soil quality of the soil structure, a nondestructive detection method is proposed to rapidly measure the soil body configuration using GPR. In this study, the longitudinal gradient information from the GPR waveform image can reflect soil stratification by using an envelope detection method to extract the envelope signal from the GPR echo and a Hilbert transform to analyze its instantaneous phase and determine the layer position. Given the relationship between the soil dielectric constant and the radar echo amplitude, this paper used the echo amplitude of the GPR to invert the dielectric constant of each layer, and then to calculate the propagation speed of the radar wave in the soil from the dielectric constant, so as to obtain the thickness of each layer of the soil profile. Based on the relationship between the image noise of the GPR waveform map and the soil sand to soil ratio, the principal component analysis method is used to evaluate the image noise for each layer of soil and obtain the sand content of each layer of soil, and combined with the support vector machine to identify the soil quality of each layer. The paper establish a knowledge base of soil structure covering regional information, soil indexes, detection information, and image multi-feature fusion information, and compile an information system for the rapid identification of soil and soil configuration, and use this method for field detection and verification in two test bases, six sampling points, and four types of soil and soil configurations around Hohhot City, Inner Mongolia Autonomous Region, China. Studies have shown that: (1) the correct rate of soil configuration recognition within 1 m below the surface of the above areas has reached more than 94%; (2) the relative measurement error of each layer of soil thickness detected is less than 10%. This research method provides a new mesoscopic detection concept for the rapid detection of soil configuration.

Key words: soil; soil body configuration; ground penetrating radar; nondestructive inspection